

## Deux représentations des connaissances de l'élève en vue de la génération de critiques

Jean-Bernard Auriol, Jean-Louis Dessalles

Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications

46, rue Barrault 75634 Paris Cedex 13

{auriol, dessalles}@inf.enst.fr - <http://www.enst.fr/~bonnet/2milc/bio/bio.html>

### Résumé

La génération automatique de critiques pertinentes pour aider un élève en train de résoudre une tâche nécessite deux choses : d'une part la détection du type de situation qui motive la critique (erreur, blocage, sous-optimalité), d'autre part le calcul du conseil à donner lorsque celui-ci ne peut être prévu à l'avance. Nous pensons que pour certaines tâches dont la combinatoire est importante, une critique pertinente ne peut être établie que si le système est capable de reconstituer la démarche de l'apprenant, c'est-à-dire s'il reconstitue de manière explicite la motivation de ses actions.

Nous présentons ici l'ébauche d'un tel système, dont le seul but pour l'instant est de reproduire les actions d'un sujet en situation de résolution de problèmes, y compris ses erreurs et ses hésitations. A partir de l'état de ce système à chaque étape de la résolution, il sera aisé d'engendrer des critiques appropriées au moment opportun, comme nous l'avons montré dans des travaux antérieurs.

L'originalité de notre système, que nous avons testé sur la performance de sujets dans la tour de Hanoï à cinq disques, repose sur la séparation radicale entre connaissances procédurales et connaissances déclaratives. Nous montrons que les deux sont nécessaires lorsqu'il s'agit à la fois de reproduire un comportement et d'engendrer des critiques<sup>1</sup>.

**Mots clés :** systèmes critiques, connaissance déclarative, connaissance procédurale, modèle des connaissances de l'élève.

---

<sup>1</sup> Cette recherche a été menée à l'Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, dans le cadre du projet PROVERB (Production Verbale et Résolution de Problèmes) de l'ARC, dirigé par Josiane Caron de l'Université de Poitiers.

## Introduction

Certaines tâches que les apprenants ont à résoudre ne se prêtent pas à des diagnostics simples basés sur une liste préétablie d'erreurs et les conseils qui leur sont associés. C'est le cas des tâches comportant une combinatoire élevée, telles qu'on peut les rencontrer dans les didacticiels organisés autour d'une simulation assez riche. Dans de telles situations, le diagnostic doit être calculé par le système. Le système peut, pour cela, ne tenir compte que de l'état de la simulation au moment de l'intervention. C'est le cas par exemple pour **[citer intelligemment, voir du côté de Fischer, d'ESMERALDA, de MENTONIEZH ou de TALC]**. Dans certaines situations et pour certains types d'apprenants, toutefois, il est nécessaire de reconnaître l'intention ou le plan de l'apprenant **[là aussi citer intelligemment]**. Le travail présenté ici consiste à montrer comment on peut effectuer assez simplement un diagnostic non seulement de l'état de la simulation, mais aussi des raisons qui ont amené l'élève à la situation dans laquelle il se trouve, grâce à un aller-retour répété entre deux types de connaissances : des connaissances procédurales et des connaissances déclaratives de nature logique.

Nous avons travaillé sur des protocoles de **[bla bla.... expliquer pourquoi Hanoï]**.

### **[Annoncer le plan]**

Nous présentons également les premiers résultats de notre expérimentation avec ce modèle. Notre expérimentation consiste à tenter de reproduire des protocoles humains de résolution de la tour de Hanoï à 5 disques. Nous concluons cet article en expliquant en quoi une double représentation des connaissances de l'élève peut s'avérer fructueuse, et en indiquant ce que nous pensons pouvoir obtenir de l'analyse des verbalisations des sujets.

## La séparation entre connaissances déclaratives et connaissances procédurales

La reconnaissance de l'intérêt de distinguer entre deux types de connaissances, et corrélativement entre deux types d'apprentissage est relativement récente. En 1987, Daniel Andler écrit [Andler 87] : "on mettra d'un côté les dispositions 'propositionnelles', relevant du 'savoir que' (knowing-that), de l'autre les dispositions 'pratiques', relevant du 'savoir faire' (knowing how). On aura donc d'une part des capacités purement inférentielles, de l'autre des aptitudes (skills), et parmi ces dernières, on distinguera peut-être des capacités à la fois motrices ou perceptives et inférentielles, et des capacités strictement non inférentielles (c'est-à-dire non représentables)". Cette différenciation ne s'est pas traduite dans les faits,

notamment quand on cherche à représenter au sein d'un système d'enseignement les connaissances (conceptuelles et procédurales) de l'élève. Le rôle d'une telle représentation est de rendre le critique capable de comprendre ce que fait l'étudiant pour savoir quand et comment intervenir dans le cas où les connaissances déclaratives (know that) et procédurales (know how) sont mises en jeu simultanément dans un apprentissage

L'idée est que ces deux types de connaissances ne partagent pas la même représentation, ni les mêmes processus d'acquisition. Une erreur constatée en phase de résolution d'exercice peut provenir d'une carence dans un des deux types de connaissance. L'objectif est de diagnostiquer correctement l'origine de l'erreur. Pour cela, le système doit être capable de suivre l'élève dans sa démarche, et dans une certaine mesure de le précéder.

Notre objectif n'est pas de fournir un modèle de l'élève complet, mais plutôt une modélisation de ses connaissances. Suivant [Self 88], nous pensons qu'il est inutile de diagnostiquer ce que l'on ne traite pas ("Don't diagnose what you can't treat"). Être capable d'indiquer d'où provient une erreur (déclarative ou procédurale) peut en effet permettre de la corriger plus aisément. Une erreur procédurale sera simplement corrigée en montrant la procédure correcte, ou à force d'exercices simples, alors qu'une erreur déclarative se traitera (par exemple) par la méthode socratique ("Entrapment").

Suivant [VanLehn 89], nous utilisons un formalisme d'opérateur pour représenter les connaissances procédurales. Suivant [Dessalles 93, pp. 11 à 53], nous utilisons un formalisme logique pour représenter les connaissances déclaratives. Cette double représentation est rendue nécessaire par la grande difficulté de réduire un formalisme à l'autre, difficulté illustrée par exemple par la forte différence faite entre les langages informatiques procéduraux et déclaratifs.

### Connaissances procédurales

Elles s'expriment par le biais d'un état du monde et d'un (ou de plusieurs) opérateur pouvant agir sur cet état du monde. L'opérateur, dans une situation donnée, va proposer des opérations selon lui légale et indiquer à quel nouvel état du monde l'opération envisagée permet d'aboutir.

Pour la tour de Hanoï, par exemple, l'opérateur indiquera dans une situation donnée quels sont les états accessibles. Ainsi, pour la tour de Hanoï à 4 disques dans sa configuration initiale (1234)(), l'opérateur, s'il est correct, pourra fournir comme premier coup possible [(1 de A en B) - (234)(1)()] et/ou [(1 de A en C) - (234)()(1)]. Un opérateur erroné pourrait fournir comme premier coup possible [(1, 2 et 3 de A en B) - (4)(123)()]. L'opérateur peut s'appeler en boucle pour calculer plusieurs coups à l'avance, en général avec une profondeur très limitée. Nous parlerons donc dans la suite de l'article de "simulation mentale" (ou de "simulation"). Le mode de fonctionnement de la simulation peut être qualifié de recherche en chaînage avant. On notera enfin que cet opérateur peut être "compilé" quand une série de coups est souvent utilisée. Ainsi la série de déplacements 1-2-1 permettant de déplacer la pyramide à deux disques dans la tour de Hanoï constitue aux alentours des trois quarts des déplacements. Il n'est pas déraisonnable de penser qu'une telle série de coups peut-être combinée dans un macro opérateur avec l'expérience, donnant alors au système une profondeur apparente de 4 alors qu'elle n'est en fait que de 2 (nous disposons d'ailleurs d'indices plaçant en faveur de cette hypothèse dans notre base de protocole).

Notre opérateur est également réversible. Il peut ainsi être utilisé pour savoir dans quelle condition un coup envisagé est possible. Par exemple (4 va de A en C) n'est possible que si 1, 2 et 3 se trouvent en B. L'opérateur est capable de fournir cette information, si l'on inverse le sens des flux de données. Une manière de voir les choses est de considérer que l'opérateur est l'expression intégrée des contraintes pesant sur l'exercice. Il s'agit de notre principale différence avec les opérateurs présentés par Kurt VanLehn (qui, il est vrai, ne se pose pas la question en ces termes).

L'opérateur, partant d'une situation donnée indique tout (ou partie) des situations accessibles jusqu'à sa profondeur limite. Il n'est responsable d'aucun choix, et ne prend pas d'initiative en cas de blocage. En effet, l'évaluation des situations accessibles, et plus encore la démarche à suivre quand rien d'intéressant ne sort de la simulation, demandent des connaissances de nature différentes de celles utilisées par l'opérateur. Ces capacités se retrouvent de manière synthétique et homogène dans le modèle de Jean-Louis Dessalles, que nous avons donc décidé d'utiliser.

### Connaissances logiques

Elles s'expriment sous la forme de règles d'incompatibilités ou d'indésirabilités. Une règle d'incompatibilité indique qu'il est impossible d'avoir simultanément vrai chacun des termes qui la composent. Une règle d'indésirabilité indique qu'il est indésirable d'avoir simultanément vrai chacun des termes qui la composent. Pour prendre des exemples triviaux :

$$\begin{aligned}(\text{quel que soit } X) \quad & (X \text{ est enceinte}) \ \& \ (X \text{ est un homme}) \Rightarrow F \\(\text{quel que soit } X) \quad & (X \text{ est enceinte}) \ \& \ (X \text{ a } 12 \text{ ans}) \Rightarrow \text{IND}\end{aligned}$$

Il s'agit d'une réécriture des règles de la logique du premier ordre en forme normale disjonctive négative. Comprendre l'énoncé d'un problème consiste donc à traduire les règles en terme d'incompatibilité et les objectifs (but du jeu, tâche à résoudre, ...) en terme d'indésirabilité.

Les capacités logiques que nous prêtons à notre sujet sont limitées. Nous considérons qu'il est capable de détecter la saturation d'une règle (se rendre compte qu'une contrainte est violée (incompatibilité saturée), ou qu'un objectif n'est pas atteint (indésirabilité saturée)) et d'inverser un terme en situation de blocage. Ainsi dans la situation mentale où X est un homme et X est en sainte, si le sujet n'arrive pas à trouver d'invalidation pour un des deux termes par le biais de ces autres capacités cognitives, la logique proposera successivement l'inversion des deux termes.

La logique est responsable de l'évaluation de la situation. Quand la simulation lui propose un état accessible, la logique l'examine en fonction des indésirabilités courantes, et décide ou non si cet état doit être atteint et donc si le (ou la série de) coup envisagé par la simulation doit être effectué.

Cette stratégie d'exploration n'est pas infaillible. Des situations de blocage se font jour en fonction de la profondeur de recherche de la simulation. Nous appelons situation de blocage un état où quel que soit la série de coups envisagée à la profondeur donnée à partir de la situation courante, aucune des indésirabilités courantes ne peut être levée. Dans ce cas, la logique choisit un terme d'une indésirabilité, l'inverse, et demande à la simulation à quelle condition cette inversion devient possible. La réponse de l'opérateur, traduit en indésirabilités, constitue le nouvel objectif courant.

Ainsi, dans la situation (4)(3)(12) et avec comme seul objectif "4 pas en C => IND", le simulateur ne trouve pas de suite correcte de déplacement permettant de résoudre l'indésirabilité courante avec une profondeur inférieure à 4. La logique va donc inverser le

terme indésirable en "4 en C", puis demander au simulateur quelles sont les contraintes sur la situation. Celui-ci va répondre que les disques 1, 2 et 3 doivent tous se trouver en B. Les objectifs "1 pas en B => IND", "2 pas en B => IND" et "3 pas en B => IND" sont alors empilés et le système peut reprendre sa recherche de manière normale.

La stratégie de recherche est donc une recherche en chaînage avant, avec diminution de la distance à l'objectif en se fixant des sous-butts en cas de blocage, et donc d'écart trop important.

### Communication

Une communication doit enfin exister entre logique et simulation afin de leur permettre de travailler conjointement sur le même problème, en gardant à l'esprit que les données qu'elles utilisent sont de nature hétérogènes. Cette communication peut prendre deux aspects, en fonction de la situation. Dans la situation de recherche exploratoire, la simulation communique à la logique de manière séquentielle les états accessibles qu'elle peut calculer. La logique valide ou ne valide pas l'état proposé. Dans le premier cas, l'action ou la série d'action associée à l'état visé est effectuée, et la simulation recommence à calculer les nouveaux états accessibles, à partir du nouvel état courant. Dans le second cas, rien ne se passe et la simulation continue de calculer jusqu'à ce que la logique valide une situation ou que l'ensemble des états accessibles à la simulation ait été rejeté (cas de blocage). Si un blocage survient, le module logique, après avoir choisi un terme à inverser, communique à la simulation quel est ce terme afin que cette dernière lui indique en retour quelles contraintes doivent être vérifiées avant que cette inversion soit rendue possible.

On constate que les informations échangées circulent dans les deux sens entre les deux modules. Or les informations logiques sont des prédicats (X est en Y), alors que les informations de la simulation sont des informations d'état ((34)(1)(2)). Une traduction entre ces deux types de données est informatiquement trivial, mais reste toutefois nécessaire. Nous avons utilisé des procédures *ad hoc* pour réaliser cette traduction. Cette traduction sera sans doute à réécrire à chaque nouvelle application (au minimum dans les cas de changement de domaine d'expertise).

Nous avons également essayé de reproduire les verbalisations des sujets dans notre réalisation informatique. Suivant en cela [Caron 96], nous considérons que les protocoles verbaux, non pas pris en tant que des descriptions des processus mentaux du sujet, mais en

tant que traces interprétables de ces procédés, peuvent être des sources précieuses d'informations sur le fonctionnement cognitif. Nous précisons cependant que les seules informations verbalisables par le sujet sont celles qu'il manipule au niveau logique.

### **expérimentation**

Notre objectif étant de permettre à un système critique de comprendre les motivations des étapes choisies par l'apprenant dans le cadre d'une résolution de tâche, nous avons cherché à reproduire le comportement observé de sujets humains engagés dans un tel exercice. Le sujet choisi est la résolution du problème de la tour de Hanoï à 5 disques. Nous avons utilisé une série de protocoles fournis par le groupe PROVERB, et nous avons utilisé un opérateur construit, simple et parfait, et une base de connaissance correcte. Nous avons ainsi réussi à reproduire le protocole non optimal le plus courant : il se présente 5 fois sur une base de 40 protocoles, dont 1 est erroné (non respect des contraintes) et 10 ne sont pas complets. Nous reproduisons aussi le protocole optimal qui est donc accessible "par hasard" à l'humain. En d'autres termes, notre théorie prédit qu'un sujet humain peut effectuer le parcours optimal sans s'en rendre compte (nous disposons d'ailleurs d'un protocole où ce fait est constaté). Le protocole fourni par notre modèle est présenté figure 1. Il indique quel coup est joué à chaque étape et accompagne sa progression d'une verbalisation limitée.

Les verbalisations sont de trois types. La plus triviale, de la forme "Le X en Y", est émise à chaque fois que le système décide de déplacer un disque d'une position à une autre. "Bon..." signifie que le système vient de se fixer un nouveau sous-but. Enfin, "Le problème c'est que le X est en Y", signifie que, à l'issue du blocage, le système va s'intéresser au disque X (et qu'il va chercher à le sortir de Y).

La verbalisation "Le X en Y" pourrait paraître être contradictoire avec le fait que l'on ne verbalise qu'au niveau du module logique. Pour lever cette contradiction, il suffit toutefois de se rappeler que c'est le module logique qui décide si oui ou non un coup est entrepris. Il devient alors clair que le sujet va verbaliser les coups qui résolvent un problème (i.e. qui lèvent une indésirabilité) et pas ceux qui n'apportent rien.

### figure 1 : résolution fournit par notre modèle

Bon...  
Le 1 en c  
Le 2 en b  
Le 1 en b  
Le 3 en c  
Le 1 en a  
Le 2 en c  
Le 1 en c  
Le 4 en b  
Bon...  
Le problème c'est que le disque 5 est en a.  
Le 1 en b  
Le 2 en a  
Le 1 en a  
Le 3 en b  
Le 1 en c  
Le 2 en b  
Le 1 en b  
Le 5 en c  
Bon...  
Le problème c'est que le disque 4 est en b.  
Le 1 en c  
Le 2 en a  
Le 1 en a  
Le 3 en c  
Le 1 en c  
Le 2 en b  
Le 1 en b  
Le 3 en a  
Le 1 en c  
Le 2 en a  
Le 1 en a  
Le 4 en c  
Le 1 en c  
Le 2 en b  
Le 1 en b  
Le 3 en c  
Le 1 en a  
Le 2 en c  
Le 1 en c

Nous présentons en figure 2 un des protocoles humains à notre disposition. La performance du sujet est identique à celle de notre système, ces verbalisations étant légèrement différentes. Il s'agit d'un sujet résolvant pour la quatrième fois le problème de la tour de Hanoï à 5 disques.

**figure 2 : protocole d'un sujet novice (4° tentative)**

énoncé	phrase	hésitation	performance
1	alors le 1 en C	2s	(5432)()(1)
2	le 2 en B	8s	(543)(2)(1)
3	le 1 en B		(543)(21)()
4	le 3 en C		(54)(21)(3)
5	alors là ça va plus	4s	
6	le 1 en	4s	
6	A		(541)(2)(3)
7	le 2 en C	6s	(541)()(32)
8	le 1 en C	2s	(54)()(321)
9	le 4	2s	
9	en B	3s	(5)(4)(321)
10	le 1	7s	
10	en B		(5)(41)(32)
11	le 2 en A		(52)(41)(3)
12	le 1 en A		(521)(4)(3)
13	le 3 en B		(521)(43)()
14	le 1 en C		(52)(43)(1)
15	le 2 en B		(5)(432)(1)
16	le 1 en B		(5)(4321)()
17	comme ça je prends le 5	2s	
17	je le mets en C	2s	()(4321)(5)
18	le 1 en C		()(432)(51)
19	le 2 en A	6s	(2)(43)(51)
20	le 1 forcément	2s	
20	en A	8s	(21)(43)(5)
21	le 3 en C		(21)(4)(53)
21	ça me dérange	4s	
22	le 3 en C	4s	(21)(4)(53)
23	le 1 en C		(2)(4)(531)
24	le 2 en B	5s	()(42)(531)
25	le 1	3s	
25	en B		()(421)(53)
26	comme ça je vire le 3		
26	il m'énerve le 3 en A	2s	(3)(421)(5)
27	le 1 en C		(3)(42)(51)
28	le 2 en A		(32)(4)(51)
29	le 1 en A		(321)(4)(5)
30	et le 4 sur le 5	2s	(321)()(54)
31	le 1 en C		(32)()541)
32	le 2 en B		(3)(2)(541)
33	le 1 en B		(3)(21)(54)
34	le 3 en C	1s	()(21)(543)
35	le 1 en A		(1)(2)(543)
36	le 2 en C		(1)()(5432)
37	et le 1 en C		()(54321)

Dans ce protocole, on trouve les verbalisations (numérotées dans la première colonne), accompagnées des temps d'hésitation éventuel. La situation du jeu à la fin de l'action du sujet est portée en quatrième colonne.

## **Conclusion**

Nous avons donc, au travers du couplage de deux formalismes existants, réalisé un système capable de reproduire des performances humaines. L'opérateur utilisé pour la simulation était un opérateur parfait. Ceci explique que nous ne reproduisons pas les tout premiers protocoles. En terme de représentation, l'intérêt est le découpage entre les objectifs que poursuit le sujet et les actions qu'il sait entreprendre. Ainsi, un système critique utilisant cette double représentation pourra avoir une attitude différente en fonction du type de dysfonctionnement suspecté. Un manque au niveau de l'opérateur pourra être traité par une répétition d'exercice (et/ou par la présentation d'un exemple de procédure correcte) alors qu'une faiblesse conceptuelle pourra être traitée par un dialogue socratique. On notera aussi que le succès de cette simulation ne permet pas d'invalidier les deux théories utilisées. La réalisation effective d'une telle modélisation des connaissances de l'élève au sein d'un système critique opérationnel reste encore à réaliser.

## **Travaux futurs**

intérêt des verbalisations pour affiner notre modèle, (tenter notamment de les reproduire).

## **Bibliographie**

- [Andler 87] Daniel Andler, "L'apprentissage dans les Sciences Cognitives : approches théoriques", in "Intellectica" n° 2, 3, pp. 213-234, 1987.
- [Caron 96] Jean Caron, "Linguistic markers and cognitive operations", in "Verbal production and problem solving", pp. 11-28, Frank Durieux Managing editor APIL, University of Antwerp (UIA), 1996
- [Dessalles 93] Jean-Louis Dessalles, "Modèle cognitif de la communication spontanée, appliquée à l'apprentissage des concepts", Thèse de doctorat, ENST, 1993.

[Self 88] John A. Self, "Bypassing the intractable problem of student modeling", in "Intelligent Tutoring Systems, At the Crossroads of Artificial Intelligence and Education", pp. 107-123, Ablex Publishing Corporation, 1990 (papiers présentés à "Conference on ITS", 1-3 Juin 1988, Montréal, Canada).

[VanLehn 89] Kurt VanLehn, "Problem Solving and Cognitive Skill Acquisition", in "Foundations of Cognitive Science", chapitre 14, pp. 527-579, A Bradford Book, The MIT Press, 1989.

voir chapitre 16 de Machine Learning, An AI approach, : Inferring Student Models for Intelligent Computer-Aided Instruction. Sleeman. Parle de MalRules. Approche : les MalRules sont des règles de production. Elles sont d'une certaine manière inutile pour la correction de l'opérateur. Quand une erreur est détectée pour l'opérateur, on montre la manière correcte de l'utiliser, où l'on fait faire des exercices que l'on corrige. Une procédure ne s'explique pas, elle se présente et elle s'apprend.